

DOI :10.16247/j.cnki.23-1171/tq.20240673

金属材料钛合金 在化工与医药领域的应用*

唐海鹏,白千祥,许馨蕊,王蒙,匡海学

(黑龙江中医药大学 教育部北药基础与应用研究重点实验室,
黑龙江省中药及天然药物药效物质基础研究重点实验室 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要 随着化工生产与材料学的高速发展,金属材料钛合金在化工与医药领域的应用越来越广泛,成功解决了传统工艺在这两大领域面临的一系列难题。而钛合金作为一种新型的金属材料,在石油工业、燃料电池、化工设备装置、海水淡化、骨科、牙科、药物释放动力学等诸多领域显示出了广阔的应用前景。本文旨在全面综述钛合金材料在化工与医药领域的应用,为实际生产和科学研究提供可靠的参考依据。

关键词 金属材料;钛合金;化工;医药;应用

中图分类号 R932

文献标识码 A

Applications of metal material titanium alloy in chemical industry and medicine field*

TANG Hai-peng, BAI Qian-xiang, XU Xin-rui, WANG Meng, KUANG Hai-xue

(Heilongjiang Key Laboratory of Drug Efficacy Study Material of Traditional Chinese Medicine and Natural Product,

Key Laboratory of Basic and Applied Research in North Medicine, Ministry of Education,

Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150000, China)

Abstract: With the rapid development of chemical production and materials science, the metal material titanium alloy is more and more widely used in chemical industry and medicine fields, successfully solving a series of problems faced by traditional processes in these two fields. As a new type of metal material, titanium alloy has shown broad application prospects in the petroleum industry, fuel cells, chemical equipment, seawater desalination, orthopedics, dentistry, drug release kinetics and many other fields. This paper aims to comprehensively review the application of titanium alloy materials in chemical industry and medicine fields, and provide reliable reference for practical production and scientific research.

Key words: metal materials; titanium alloy; chemical industry; medicine field; application

钛合金是一类由钛(Titanium,化学符号 Ti)与其他金属元素合金化而成的一类金属合金。钛与其他金属元素的合金化使得钛不仅可以提高其力学性能,还可以改善其物理特性以更好地适应不同的实际需求^[1]。钛合金具有高强度、低弹性模量、优异的耐腐蚀性、良好的生物相容性等特点,在化工和医药领域得到了广泛应用^[2,3]。在化工领域,钛合金常被选用于石油和天然气开采、燃料电池、海水淡化、制造化工设备、管道和反应器,尤其在处理酸、碱、氧化物等腐蚀性介质时表现出色。此外,钛合金还被广泛

应用于制造化工阀门、泵和电解槽等设备,为化工生产提供了可靠的材料基础。在医药领域,由于钛合金具有良好的生物相容性,因此,被广泛用于制造骨科植入物,如人工髋关节和牙科植入物。此外,钛合金在药物释放动力学等方面也发挥了重要作用,广泛涉及药物输送系统的设计和优化。通过将钛合金纳入药物输送系统的构建,成功实现了对药物释放速率和方式的精准调控。这一创新性应用为医学科研和治疗提供了更为高效和前沿的选择。本文主要从钛合金材料在化工与医药两大领域的应用进行详细阐述,为钛合金材料在化工与医药领域的应用和发展提供参考。

1 金属材料钛合金在化工领域的应用

1.1 在石油工业方面的应用

在深水、高温高压、高腐蚀等油气勘探逐渐向非

收稿日期 2024-01-18

基金项目 黑龙江省省属本科高校优秀青年教师基础研究支持计划资助[重点项目] 国家中医药管理局中医药传承与创新“百千万”人才工程—岐黄工程首席科学家支持项目(国中医药人教函[2021]7号)

作者简介 唐海鹏(2000-),男,硕士研究生在读,主要从事中药化学研究。

通信作者 匡海学(1955-),男,教授,主要从事中药学研究。

常规油气资源扩展的趋势下,传统油井管材无法满足这些极端的使用条件。因此,钛合金油井管备受关注。钛合金因其比强度高、耐腐蚀性强、弹性模量低、易于冷成型、抗海水侵蚀等特性,特别是能够有效解决油井管道在恶劣工况下发生腐蚀失效的问题,使其成为在深井、超深井、短半径水平井和高酸油气井等极端环境中应用的理想选择^[4]。这使得钛合金油井管成为支撑非常规油气资源勘探和开发的强大工具。

杨彪等人^[5]发现通过采用钛合金油井管,不仅能够大幅度减轻油井管的总质量,降低开采机构负荷,同时钛合金的焊接性能优异,在高温高压环境下适应性好。而且钛合金油井管还具有很高的经济性,这些对于深水勘探和生产等应用场景具有重要的实际意义。此外,钛合金可以用于制作在特殊工艺开采的油井中需要的钻杆和油套管。钛合金钻杆具有较高的柔韧性、较小的结构强度、较强的抗疲劳性、优越的抗腐蚀性以及较轻巧的质量等优点。更有趣的是,热轧工艺的钛合金钻杆不仅继承了普通钢管的强度,还融合了合成材料的柔韧性。使用钛合金制造的油套管可以更好地保证钻井过程和完井后整个油井的正常运行。奚运涛等人^[6]研究发现,采用钛合金制造的油套管,在深度为1524m、温度为260~287℃的热采井中,应用145钢级钛合金套管效果显著,能较好地保证钻探过程和整个油井结束后的正常运转。

总体而言,钛合金在石油工业开发中的应用,为解决极端工况下的技术难题提供了可行的解决方案,进一步推动了油气行业的发展。

1.2 在燃料电池方面的应用

燃料电池技术广泛应用于现代工业生产中,如用于电力备份系统、无人机、工业机器人等。它们可以提供可靠的电力,并减少对传统燃料的依赖。但目前现有的燃料电池的寿命、气密性以及抗腐蚀性还不够好,无法满足实际工业生产需要^[7]。

盖彦青等学者^[8]运用单模光纤激光器进行燃料电池钛合金材料的焊接实验。经过系统调整,正交测试时,发现工艺参数相对最优。通过最佳工艺参数对燃料电池钛合金极板进行焊接,压力条件下进行密封测试,结果显示,产品在0.30MPa下无漏气。同时对TC4钛合金母材进行腐蚀测试,对焊缝进行激光焊接。测试结果显示,TC4钛合金母材和激光焊接的焊缝表面均未出现明显的颜色变化,也没有腐蚀孔洞和凹坑等缺陷。这说明TC4钛合金的激光焊接焊

缝能够满足燃料电池对抗腐蚀性的要求。王明超等人^[9]致力于解决燃料电池不锈钢双极板电堆寿命短的问题。TA1、TA9、TA10、Ti35等4种钛合金过渡层通过增强滤脉冲偏电弧离子镀技术,在316L不锈钢双极板基体上成功沉积。在电化学耐蚀性能的比较中,Ti35钛合金作为过渡层展现出优异性能。使用Ti35钛合金过渡层不仅明显提高了耐蚀性能,而且也延长了燃料电池的使用寿命。

1.3 在化工设备装置方面的应用

全球化工技术的进步带来了更先进的化工技术和装置。化工装置在化工生产中起到关键性的作用,化工装置的性能直接关系到生产效率和产品质量。由于钛合金具有高强度、优异的耐蚀性以及良好的内热性能,因此,广泛应用于制造化工设备,尤其在近年来得到了广泛推广。然而,目前在使用钛合金设备时仍存在一些问題,尤其是在钛合金设备的焊前处理、焊接工艺选择和焊接缺陷的防范方面仍缺乏一些有效的补救措施。高俊生等人^[10]针对化工装置应用钛合金开裂的处理方法中,强调正确选择焊接工艺参数的重要性,包括焊接温度适宜、焊接速度适宜等,以解决开裂问题。此外,为保证焊接界面的质量,去除焊件表面及焊丝表面的有机物质,如氧化皮、油污等,也被视为其中的关键步骤。焊接时必须精确控制Ar的流量和流速,防止因充气防护效果差而导致气流湍急进而产生不良效果。通过保持Ar的均匀流动,可以有效防止O₂的进入,减少氧化的风险,从而降低裂纹的发生率。值得注意的是,还可以采用手工钨极氩弧焊这一焊接方法来处理钛合金,这种方法不仅可行而且能够取得满意的效果。手工操作可以更灵活地掌握焊接过程,使得焊缝更为均匀,减少裂纹的产生。这一研究为解决钛合金在化工装置中的开裂问题提供了行之有效的方法,为改进焊接工艺和提高钛合金设备的可靠性提供了有益指导。此后,边雯雯^[11]进一步强调了对钛合金材料自身特性的深入理解,并提倡加强对各个环节的质量控制,以有针对性地解决化工设备装置中的焊接问题和裂缝问题。确保在化工生产中达到更高的可靠性和安全性。

1.4 在海水淡化方面的应用

由于全球淡水资源相对有限,因此,在解决水资源紧缺问题上,海水淡化技术显得异常重要。研究表明,耐海水腐蚀的最佳材料是钛合金^[12]。

张文毓^[13]指出,目前在海水淡化设备中,尤其是在多级闪蒸海水淡化装置技术上,主要采用钛合

金作为导热管。该技术具有相当成熟的优点,出水量大、淡水质量高、淡化成本低、适用范围广、操作稳定。值得关注的是,电厂低品位热能的充分利用,使多级闪蒸海水淡化装置的能源利用率显著提高,从而使其在可持续发展中优势显著。其次,由于钛合金具有耐高温离子腐蚀的特性,因此,在海水淡化装置中广泛应用于蒸发器的制造。这使得海水淡化过程在高温环境下能够保持设备的稳定运行。另外,在海水淡化设备中,钛合金本身的抗腐蚀能力也使其成为热交换器的首选材料。

综合而言,钛合金在海水淡化技术中的应用有助于提高设备的性能和可靠性,为解决全球淡水资源短缺问题提供了一种可行的技术途径。

2 金属材料钛合金在医药领域的应用

2.1 在骨科方面的应用

钛合金在骨科领域应用十分广泛,主要得益于其优异的生物相容性、高强度、轻质量、耐腐蚀和良好的可加工性。钛合金是重要的骨科植入物材料^[14]。

张正也等研究人员^[15]发现,3D打印技术具有个性化和精准化定制的显著优势。通过结合钛合金的优良特性,可根据病人原有的骨骼结构进行个性化的定制。这种方法可以制造出与患者自身骨骼形态一致、微观结构相近的植入体。充分利用外形匹配的优势,最大程度地还原生物力学特性,有助于缩短软组织重新适应的过程,更有效地促进骨长入并加速骨愈合的达成。这一创新方法有望在医学领域中推动个体化治疗和骨科手术的发展。为确保在骨科领域中安全应用3D打印技术,王涵等研究者^[16]进行了钛合金在骨科应用中的亚慢性全身毒性研究。他们采用SD大鼠,通过尾静脉注射途径进行亚慢性全身毒性实验,采用多项指标来评估3D打印骨科钛合金的亚慢性全身毒性,包括监测大鼠的身体质量、血液学、临床生化、脏器系数和组织病理等。结果显示,3D打印骨科钛合金在实验中没有观察到任何SD大鼠生物学上的显著异常指标,在亚慢性全身毒性方面也没有显示出不良影响。这为进一步应用于骨科领域的3D打印技术提供了有益的毒理学评价。刘迅等人^[17]随后揭示了 β 钛合金在3D打印技术中的潜力。他们发现 β 钛合金具有更低的弹性模量,这一发现为3D打印技术指明了新的研发方向。通过这项研究,他们成功地实现了对骨组织的精确

复制,为医学和生物工程领域的应用提供了有力支持。此外,也有研究显示,不含有毒元素V和Al的 β 钛合金弹性模量更低,强度更高,生物相容性更好^[18]。由于其不容易引发“应力屏蔽”现象,因此综合性能更为出色。这使得 β 钛合金成为骨科内植入产品的理想材料,如髌关节、膝部、踝部、肩部、肘部、腕部、指关节等,骨创伤产品(如螺钉、钢板、髓内钉等)以及骨内固定系统(如脊椎内固定系统)等^[19]。

2.2 在牙科方面的应用

钛合金以其卓越的机械性能、生物相容性和耐腐蚀性在口腔种植、固定义齿、活动义齿及牙体缺损修复等领域广泛应用^[20-21]。

在医学不断进步、研究不断深入的情况下,对它的性能要求也越来越高。为此,杜锦锦等研究者^[22]采用机械处理、物理化学和生物化学等方法进行表面改性,不仅显著改善了材料性能,而且使其能够满足不同领域的特殊需求。这些改进为临床提供了更多选择,有助于更精准地应用合适的钛合金材料。在过去,常用于牙科修复的合金包括含有有毒元素Al和V的材料,如Ti-6Al-4V和Ti-6Al-7Nb等。然而,近年来,国内外的研究者已经纷纷将注意力转向了对无毒牙科修复用钛合金的深入研究^[23]。研究者们认识到,Mo和Nb等元素被认为是 β 相稳定元素,它们的引入能够有效提高合金的强度和塑性,同时降低合金的弹性模量。而且,这些合金的生物相容性也很好。徐丽娟^[24]成功地利用LZ5型离心铸钛机制备了Ti-Mo、Ti-Nb和Ti-Mo-Nb合金材料。通过对这些合金的显微组织、力学性能、摩擦磨损和腐蚀特性进行系统研究,进一步深入调查了优化的 β 型Ti-Mo-Nb合金的生物相容性和铸造性能。通过采用熔模精密铸造工艺,成功地制备了适用于口腔修复的牙冠。这些研究成果为开发更安全、更有效的口腔修复材料提供了有力支持。

2.3 在药物释放动力学方面的应用

占据全身骨关节结核病例中约10%~15%的髌关节结核是最为常见的四肢骨关节结核之一。近年来,髌关节结核的患病率呈现逐年上升的趋势^[25]。在髌关节结核的晚期,关节经历了严重的损害,表现为软骨的脱落以及软骨下骨遭受侵蚀和破坏。这一情况可能导致病患在髌关节功能方面遭受重大影响。以往常规的治疗方法是采用关节融合,但近年来一期关节置换逐渐受到广泛认可^[26-27],但在关节置换后仍有可能出现术后复发的风险,尤其是随着耐药结核病人较多和耐利福平结核病人逐渐增多的情

况下,更是如此。目前,如何更有效地降低人工关节置换术后关节结核复发的风险是当务之急。在这样的背景下,在人造关节假体表面钛合金就成了常用的材质。为减少晚期关节结核在人工关节置换术后的复发风险,高旭鹏等研究人员^[28]探索将利福平(Rifampicin, RFP)缓释涂层引入钛合金材料表面的可行性,并对其释放药物的体内外特性进行研究,以降低人工关节置换术后晚期关节结核的复发风险。钛合金材料表面成功形成聚多巴胺(PDA)薄膜,通过迈克尔加成反应生成。随后,将利福平粉剂加入交联淀粉(CS)和四臂巯基聚乙二醇(PEG)中制成水凝胶。Ti-PDA-PEG-CS-RFP(Ti-PPCR)涂层通过浸渍提拉法在PDA薄膜表面涂覆水凝胶,最终成功制备。药物释放特性通过使用高效液相色谱法在模拟体液中检测得到。结果发现,前3d Ti-PPCR药物释放速度较快,累计释放药物数量占总药物数量的63.2%。随后释放趋于平缓,总释放率达到了79.2%,释放时间长达9d。在体内实验中,20只新西兰大白兔的右侧股骨中植入了携带6.2mg药物的Ti-PPCR钛合金片,分别在术后5、10、15、20d进行实验。结果发现,在身体内骨组织和肌肉组织中,药物浓度上升很快,到了最高峰的第5天,之后,药物浓度就慢慢减少了。总释放周期分别可长达20d和10d,且均在最小杀菌浓度以上。值得注意的是,利福平并未被检出存在于兔静脉血液中。综合来看,钛金属表面构筑的Ti-PPCR利福缓释涂层,在药物释放动力学方面表现出显著的局部缓释效果。

3 结语

随着金属材料钛合金的持续发展,其已经深度融入化工和医药领域,发挥了独特的优势。在石油工业、燃料电池、化工设备装置、海水淡化、骨科、牙科和药物释放动力学等多个领域,钛合金凭借卓越的性能为解决复杂问题提供了创新的解决方案。在化工领域,钛合金可以更好地用于石油工业开发,明显提高了燃料电池的耐蚀性能,延长了其使用寿命,解决了化工设备装置中的焊接问题和裂缝问题,提高了海水淡化技术设备中的性能和可靠性。在医药领域,钛合金成为骨科和牙科修复的理想材料,同时在药物释放动力学方面展现出了显著的局部缓释作用。然而,钛合金目前仍然面临一系列问题,如高成本、难加工、在可持续性和环保等方面仍存在挑战。这需要不断的研究和技术改进,以降低成本、提高加

工可行性,并寻找更环保和可持续的生产方法。相信随着化学工业和材料学的蓬勃发展,预计钛合金将逐步克服这些问题,不断完善并深入应用于化工和医药领域。这种发展不仅有助于推动科学研究取得新的突破,也为产业提供了更具创新性和可持续性的解决方案。

参考文献

- [1] 郭克星. 钛合金的制备和应用[J]. 热处理, 2023, 38(5): 8-12.
- [2] 邢勇香. 钛合金化学机械抛光工艺研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2023.
- [3] Liang Y, Song Y, Wang L, *et al.* Research progress on antibacterial activity of medical titanium alloy implant materials[J]. *Odontology*, 2023, 111(4): 813-829.
- [4] 王平, 杨绍兰, 杨菘培, 等. 钛合金在油气行业的应用及研究进展[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(6): 69-78.
- [5] 杨彪, 王平, 龚云柏, 等. 油气行业用钛合金油井管生产与研究应用进展[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(9): 12-21.
- [6] 奚运涛, 刘星辰, 黄晓江, 等. 钛合金材料在石油工业中的应用及其抗腐蚀性能研究进展[J]. *焊管*, 2023, 46(11): 1-8; 13.
- [7] 郝春苗. 包埋法制备TiC改性钛合金燃料电池双极板的性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- [8] 盖彦青, 刘小斐, 王伟. 燃料电池钛合金极板激光焊接工艺研究[J]. *应用激光*, 2021, 41(2): 271-275.
- [9] 王明超, 林国强, 莫亚杰, 等. 钛合金过渡层对燃料电池不锈钢双极板表面改性薄膜综合性能的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(11): 972-979.
- [10] 高俊生, 常江. 化工装置钛合金设备常见缺陷及修复办法[J]. *炼油与化工*, 2007, 18(2): 32-34.
- [11] 边雯雯. 化工装置钛合金设备常见缺陷及修复办法[J]. *山东工业技术*, 2014, (16): 17.
- [12] 张汾. 海水淡化受到日益重视 钛合金应用前景广阔[J]. *水处理技术*, 2005, (5): 88.
- [13] 张文毓. 钛及钛合金在海水淡化中的应用[J]. *新材料产业*, 2009, (3): 30-33.
- [14] Wood J, Hayles A, Bright R., *et al.* Nanomechanical tribological characterisation of nanostructured titanium alloy surfaces using AFM: A friction vs velocity study[J]. *Colloids and surfaces. B, Biointerfaces*, 2022, 217: 112600.
- [15] 张正也, 刘晓奇, 庄金鹏, 等. 3D打印钛合金在骨科的临床应用及进展[J]. *实用骨科杂志*, 2021, 27(9): 820-824.
- [16] 王涵, 赵丹妹, 许建霞, 等. 3D打印骨科钛合金的亚慢性全身毒性研究[J]. *组织工程与重建外科杂志*, 2020, 16(1): 6-10.
- [17] 刘迅, 张云秀. 骨科用钛合金研究进展[J]. *轻工科技*, 2021, 37(10): 16-17.
- [18] Sidhu S.S, Singh H, Gepreel MA. A review on alloy design, biological response, and strengthening of β -titanium alloys as biomaterials[J]. *Materials Science & Engineering, C. Materials for biological applications*, 2021, 121: 111661.
- [19] 谢辉, 张玉勤, 孟增东, 等. β 钛合金特性及其在骨科领域的应用现状和研究进展[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2013, 10

(下转第72页)

- coverable Z- scheme ZnFe₂O₄/Fe₂O₃ perforated nanotube for efficient photocatalytic ciprofloxacin removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430(1):132728.
- [4] Hussain S, Hussain S, Waleed A, *et al.* Spray pyrolysis deposition of ZnFe₂O₄/Fe₂O₃ composite thin films on hierarchical 3- D nanopikes for efficient photoelectrochemical oxidation of water [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(34): 18360- 18368.
- [5] Wei P, Yin S, Zhou T, *et al.* Rational design of Z- scheme ZnFe₂O₄/Ag@Ag₂CO₃ hybrid with enhanced photocatalytic activity, stability and recovery performance for tetracycline degradation[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 266:118544.
- [6] 范顶, 王黎明, 徐丽慧, 等. ZnFe₂O₄/TiO₂ 复合材料的表征及其光催化性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(7): 298- 302.
- [7] 彭金龙, 罗天雄, 汪万强, 等. 叶状 ZnFe₂O₄/ZnO 类 Fenton 光催化剂的制备及降解邻苯二甲酸二丁酯 [J]. 水处理技术, 2018, 44(12): 56- 58; 67.
- [8] Li C W; Zhang A C; Zhang L X, *et al.* Enhanced photocatalytic activity and characterization of magnetic Ag/BiOI/ZnFe₂O₄ composites for Hg-0 removal under fluorescent light irradiation[J]. Applied Surface Science, 2018, 433:914- 926.
- [9] Liang P L; Yuan L Y; Deng H, *et al.* Photocatalytic reduction of uranium(VI) by magnetic ZnFe₂O₄ under visible light[J]. Applied Catalysis B Environmental, 2020, 267: 118688.
- [10] Elango D, Manikandan V, Packialakshmi, J S, *et al.* Synthesizing Ag₂Ox(3wt%)- loaded ZnFe₂O₄ photocatalysts for efficiently saving polluted aquatic ecosystems [J]. Chemosphere, 2023, 311(2): 136983.
- [11] 王秋娴, 李凯, 杨贝宁, 等. 海藻酸钠引导合成纳微复合结构 ZnFe₂O₄ 及其在锂离子电池中的应用[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(9): 2039- 2045.
- [12] 韩臻臻, 贾慧敏, 杨树华, 等. ZnFe₂O₄ 纳米粒子 - 石墨烯复合材料制备和超级电容器性能[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(1): 86- 89.
- [13] 张亚军, 姚忠平, 姜兆华. 热氧化烧结条件对树枝状 ZnFe₂O₄ 结构及光催化制氢性能的影响[J]. 功能材料, 2016, 47(S2): 130- 134.
- [14] Nagajyothi P C, Devarayapalli K C, Jaesool S, *et al.* Highly efficient white- LED- light- driven photocatalytic hydrogen production using highly crystalline ZnFe₂O₄/MoS₂ nanocomposites[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(57): 32756- 32769.
- [15] 郭佳佳. ZnFe₂O₄ 尖晶石的制备、改性及光催化水蒸气还原 CO₂ 性能[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [16] 赵舜辉. ZnFe₂O₄/TiO₂ 的制备及光催化净化 NO_x 性能的研究 [D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.
- [17] 姜仁政, 矫义来, 孙博, 等. ZnFe₂O₄- α - Fe₂O₃/SiC 泡沫结构催化剂的制备和丁烯氧化脱氢性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 225- 232.

(上接第 76 页)

- (6): 29- 32.
- [20] Takeuchi Y, Tanaka M, Tanaka J, *et al.* Fabrication systems for restorations and fixed dental prostheses made of titanium and titanium alloys [J]. Journal of Prosthodontic Research, 2020, 64(1): 1- 5.
- [21] 张新平, 于思荣, 夏连杰, 等. 钛及钛合金在牙科领域中的研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, (4): 246- 251.
- [22] 杜锦锦, 汪大林. 牙科钛及钛合金的表面改性新进展[J]. 国际口腔医学杂志, 2010, 37(6): 703- 706.
- [23] 吴全兴. 钛及钛合金在牙科领域应用的新动向[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 46.
- [24] 徐丽娟, 肖树龙, 陈玉勇. Mo、Cr 元素对牙科用钛合金显微组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, (12):909- 911; 897.
- [25] Neogi DS, Yadav CS, Ashok Kumar, *et al.* Total hip arthroplasty in patients with active tuberculosis of the hip with advanced arthritis [J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 2010,468(2): 605- 612.
- [26] Kumar V, Garg B, & Malhotra R. Total hip replacement for arthritis following tuberculosis of hip[J]. World Journal of Orthopedics, 2015,6(8) :636- 640.
- [27] Zeng M, Hu Y, Leng Y, *et al.* Cementless total hip arthroplasty in advanced tuberculosis of the hip[J]. International Orthopaedics, 2015, 39(11): 2103- 2107.
- [28] 高旭鹏, 余方圆, 陈明, 等. 钛合金表面利福平复合凝胶涂层的药物释放动力学研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(7): 649- 654.